

連載

最新宇宙誌【15】

エポックⅣ：星と銀河の形成
～構造形成の時代（後編2）～

福江 純（大阪教育大学）

6. Λ CDM 構造形成モデル

銀河形成論についての古典的シナリオが破綻した後に提案された、さまざまな中間的モデルは跳ばして、現在の標準的なモデルである、 Λ CDM モデルを紹介しよう。この変な名前（ラムダ シーディーエム）のうち、 Λ はアインシュタインの宇宙項（ Λ 項）の意味で、CDM はコールドダークマター（冷たい暗黒物質）の意味だが、いろいろちぐはぐに組み合わせさせた極め付きのジャーゴン（業界用語）の一つである。

6.1 ダークマターの観測

ダークマター（暗黒物質）の観測については、あちこちで書いたことがあるので、この連載でも書いたような気がしていたが、過去の連載を検索しても、あまり説明していなかったようである。いままでにあちこちで書いたことの繰り返しになってしまうが、以下で簡単に説明しておきたい。

まず、最近の観測例について、【エポック3】の5.1節で述べた、「弾丸銀河団」を思い出して欲しい（『天文教育』2009年3月号）。その部分を一部、再掲する。

．．．

現在の宇宙では、通常物質は星や星間物質さらにそれらの巨大な集合体である銀河といった様相を取っているが、暗黒物質は銀河や銀河間空間に広範に拡がっていて、通常物質の分布と暗黒物質の分布とは、ときとせずれができていく（図15）。しかし、まだ星や銀河が形成されていない初期宇宙では、通常物質と暗黒物質は入り交じっていた、と想像されている。



図15 弾丸銀河団 1E~0657-56

この銀河団は2つの銀河団が衝突合体して形成されたと考えられている。多くの白や薄いオレンジ（原図では）の丸い像は、ハッブル宇宙望遠鏡などで撮像された可視光画像で、銀河団に含まれる多数の銀河である。もやもやした画像が左右に4つほど並んでいるが、中央付近のピンク（原図）の2つの像は、チャンドラX線衛星が撮像したX線像で、高温のガスを表しており、また同時に銀河団に含まれる大部分の通常物質の分布を示していると考えられている（可視光で見える銀河よりガスの方が質量が多い）。さらにその両側の2つの青い（原図）丸い像は、重力レンズ効果を用いて推定された通常物質よりはるかに大量の暗黒物質の分布を表している。通常物質よりはるかに大量の暗黒物質が、通常物質とは違う分布をしていることがわかる。ちなみに“弾丸”の由来は、中央の2つのX線像のうち、右側のものが右に尖った鎌（やじり）のようにみえるためらしい。

（出典：Bullet Cluster；http://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/multimedia/photos06-096.html）。

初期宇宙のわずかなゆらぎを種として、通常物質と暗黒物質は、太陽の10万倍くらいの質量をもつガス雲——「ミニハロ（minihalo）」と呼ばれることもある——を形作り、その中で、最初の星が形成されただろうと考えられているのだ。

・・・

カラーで見るとよりはっきりわかるのだが、この弾丸銀河団の観測は、かなり劇的なことだった。重力レンズ像の解析から、さまざまな銀河団中におけるダークマターの分布は次第に判明してきていたが、ここまで劇的なものはなかつただろう。ダークマターは、ガスのような通常物質とは異なる形態で、互いをすり抜けることができる（圧力などの相互作用がない／弱い）粒子状の物質なのだ。

6.1.1 存在できないはずの銀河団

ニュートンの万有引力とアインシュタインの一般相対論を信奉する限り、宇宙の奥深くには、光っていないために目には見えないものの、周囲の天体や物質に力を及ぼしている闇の勢力「暗黒物質／ダークマター（dark matter）」が存在すると考えざるを得ない。この闇の勢力にはじめて気づいた人間は、スイス出身の天文学者フリッツ・ツヴィッキー

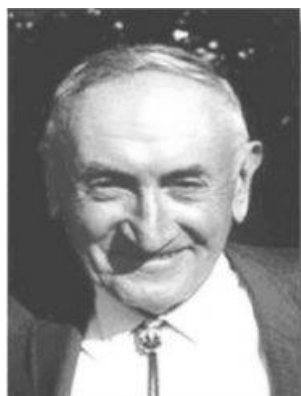


図37 フリッツ・ツヴィッキー
ウィキによると生まれはブルガリアで、スイス国籍だが、主としてアメリカのカルテク（カリフォルニア工科大学）で研究したらしい。

（Fritz Zwicky；1898～1974、図37）だった。彼は銀河団の振る舞いがおかしい、銀河団は存在できるはずがない、と言い出したのだ。1933年のことである。

数十個から数百個程度の銀河が集まった集団が「銀河団」である。たとえば、おとめ座の方向で約5900光年の距離にある「おとめ座銀河団」は、巨大楕円銀河M87などを含む50個程度の銀河からなる集団だし、かみのけ座の方向で4億光年の彼方には100個以上の銀河を含む「かみのけ座銀河団」がある（図38）。ツヴィッキーはこのような銀河団（とくにおとめ座銀河団とかみのけ座銀河団）の中に含まれる個々の銀河の挙動を調べていた。

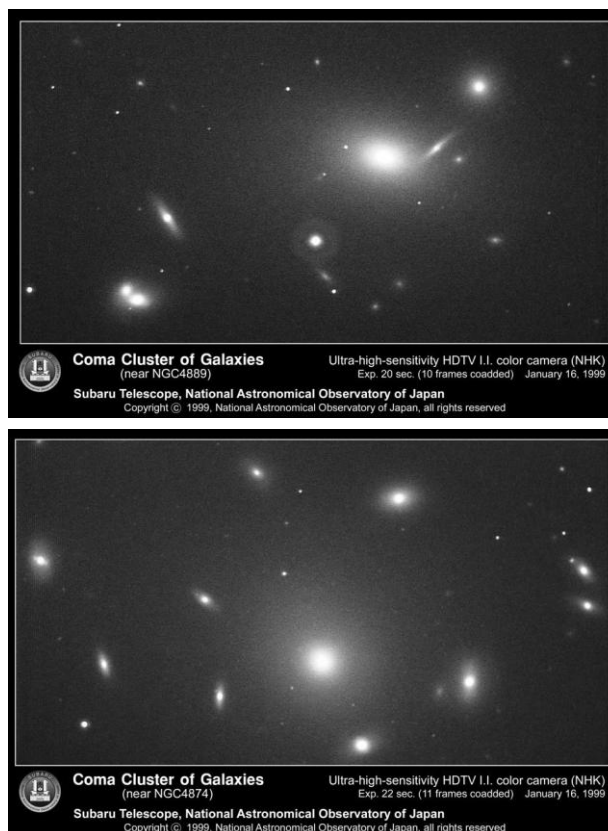


図38 かみのけ座銀河団（国立天文台）

彼はまず、銀河団に含まれる各銀河の明るさを測定した。それらの銀河がふつうの星からできていると仮定すると、われわれの銀河系内の星の調査から星1個の明るさや質量の

分布はだいたいわかっているのだから、銀河全体の明るさが太陽何個分に相当するかがわかる。すなわち、その銀河の“総質量”が見積もれる。たとえば、かみのけ座銀河団の場合、こうして見積もった総質量は太陽の数兆倍だった。このようにして銀河の明るさから星の個数に引きなおして求めた質量を「光学的質量」と呼んでいる。

一方で、彼は、銀河団に含まれる各銀河の運動の様子を調べた。銀河団のような宇宙の彼方でも、ニュートンの万有引力は成り立っていると考えるのが妥当である。そして銀河団中の個々の銀河には、他の残りすべての銀河からの重力が働いているはずだ。一個一個の銀河が銀河団から逃げ出したりあるいは中心に落ち込んだりしないためには、他の銀河全体からの重力を相殺する程度のほどよい速度で、その銀河が運動していることが必要である（図 39）。したがって、個々の銀河の運動速度を測定してそれらを平均すれば、銀河団全体の質量を見積もることができるのだ。たとえば、かみのけ座銀河団の各銀河は、だいたい秒速 1000km ぐらいの速度で飛び廻っている。これぐらいの運動速度をつなぎとめるためには、かみのけ座銀河団の質量が太陽の 500 兆倍くらい必要だ、というようなことがわかるのだ。このような方法で求めた質量を「力学的質量」と呼んでいる。

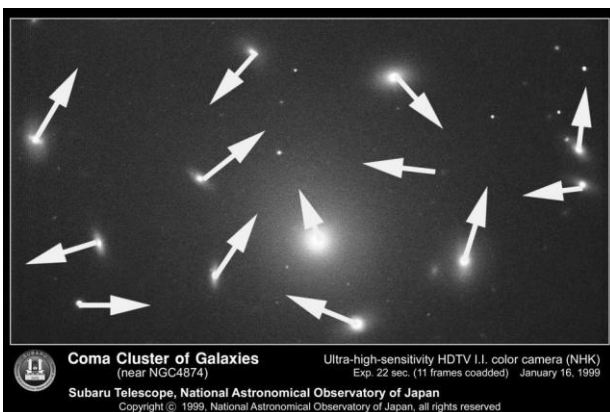


図 39 銀河団中を動き回る銀河（イメージ）

そして驚くべきことに、銀河の運動から求めた銀河団の力学的質量は、光学的質量より数十倍から数百倍も大きかったのだ。たとえば、上で述べたように、かみのけ座銀河団の場合、光学的質量は太陽質量の数兆倍だったが、力学的質量は太陽質量の 500 兆倍にもなったのだ。言い方を変えれば、もし光学的質量が正しいならば、銀河団中の銀河はお互いに引き合うには重力がまったく不足なくて、銀河団から飛び散ってしまい、銀河団などという集団は存在できないはずなのだ！

ツヴィッキーは正統的で信頼のおける観測天文学者だったので、彼の主張には多くの人々が耳を傾けた。しかし、あまりにも突拍子もない結論だったので、どこかに何か間違いがあるのだろうと思ったのだろうか、彼の主張は受け入れられなかった。今日では、ダークマターは、宇宙の全物質質量の 90% 以上をも占めているのではないかとされている。しかし、当時はまだ時が満ちていなかった。彼の主張が正しいことがわかるまでには、まだ半世紀という年月が必要だったのである。

6.1.2 銀河回転の謎

ダークマターの存在について、多くの天文学者が真剣に悩み出したのは 1970 年代も後半になってからぐらいだろう。先に触れたように、渦状銀河の安定性と回転速度の問題が目の前に突きつけられてからだ。

観測的な問題としては、渦状銀河の回転曲線の問題が持ち上がっていた。

渦状銀河には星だけではなくガスも含まれている。それら星やガスは、太陽のまわりを惑星が回っているように、銀河の中心のまわりを回っている。だから星やガスの運動を調べれば、渦状銀河に含まれている物質の質量がわかるはずである。これは銀河団の力学的質量を求める方法と原理は同じである。そして、銀河団の場合と同じ問題が起こったのだ。

すなわち、光学的質量よりも力学的質量の方が10倍くらい大きかったのである。

銀河1個の明るさを調べると、そこに含まれている星の質量を求めることはできる。実際にはガスなども含まれているが、銀河系内の調査からガスなどの量は星の1割から数割ぐらいなものである。こうやって求めたのが、銀河の光学的質量だ。

一方で、渦状銀河は回転しているので、いろいろな半径での星やガスの振る舞いを調べると、いろいろな半径での星やガスの回転の速度がわかる。半径に対して回転の速度をプロットしたものを「回転曲線（rotation curve）」と呼んでいる（図40）。そして、実際にいろいろな銀河について回転曲線を作成してみると、銀河のずっと外周の方まで回転速度が一定のままである例が頻繁に発見されたのだ。

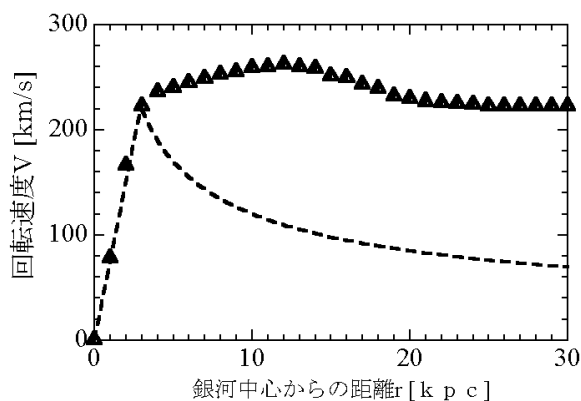


図40 渦状銀河の回転曲線

横軸が銀河中心からの距離で、縦軸がその距離での星やガスの回転速度を表している。銀河の物質が目に見える星々（+ガス）だけなら、遠方では破線のように落ちていくはずだが、実際には▲印のように遠方まで平坦（flat）なままになっている。それだけの回転を引き留めるためには、光で見えているもの以外に大量の物質——ダークマター——が必要になる。

銀河団の場合と同じく、この回転速度から質量に引きなおしたものが力学的質量なのだ

が、いくつもの渦状銀河を調べたところ、回転速度の大きさから見積った質量が、光で見えている質量の10倍もあることが珍しくないのだ。

すなわち、一つひとつの銀河にも、目には見えないが重力はおよぼす物質、ダークマターが大量に含まれていたのである。

当時、多数の銀河の回転曲線を測定したアメリカの天文学者ベラ・ルービン（Vera Rubin; 1928～、図41）が来日して、大学でコロキウムをしたのだが、英語の講演を聴くのははじめてに近くてあまり聞き取れなかったものの、なんやらすごい話だと思いながら聞いていた覚えがある。当時は、ダークマターという言葉自体もまだ定着していなくて、“ミッシングマス（失われた質量）”とか“ヒドゥンマス（隠された質量）”などという言い方もされていた。



図41 ベラ・ルービン

6.1.3 計算機の中で壊れる円盤銀河

一方で、理論的にも渦状銀河の安定性と呼ばれる困った問題が生じていた。

1980年当時は、ちょうど大型計算機の性能が上がり、といっても今日のパソコンレベルなのだが、銀河の星々の運動を計算機の中でシミュレートする研究が盛んになり始めたこ

ろだ。星を 1000 個とか 1 万個とか一般的には N 個ほど取り扱うシミュレーションなので、しばしば「 N 体シミュレーション(N-body simulation)」と呼ばれていた。

そして、円盤状の渦状銀河の振る舞いをシミュレートするために、円盤状に星を分布させて回転させてみると、あつという間に、円盤状の形状が壊れて丸くなってしまふのである。宇宙で壮麗な姿を見せている渦状銀河は、力学的には長時間安定に存在できないはずなのだ。

ぼくは大学院に入ったばかりだったが、ゼミのたびに、先輩の院生が大騒ぎしていたのをよく覚えている。ぼくが在籍していた京都大学宇宙物理学教室の理論分野では、当時、恒星系力学が中心的研究課題だったこともあって、その手の話もよく聞かされたのだ。具体的な話になるとイマイチ以上よくわからなかったが、どうにもこうにもとんでもなく困った状態になっていることだけはよくわかった。

ところで、円盤状に星を置いただけでは壊れてしまふ渦状銀河なのだが、もし、正体はともかくとして、渦状銀河の周囲の銀河ハロ領域に星の 10 倍 (!) もの質量を置くと、なんと、円盤は安定に存在できるのである。ダークマターの質量分布の井戸の底では、渦状銀河は壊れずに回転し続けるのだ。

6.1.4 銀河団のまわりの蜃気楼

信じていないものは、そこにあっても見えないものだが、いったん信じてしまうと、見ようと思えば見えてくるものだ。ダークマターがあると思われるようになると、ダークマターの証拠もいろいろな方法で集まりはじめた。

1986 年、キットピーク国立天文台の R・リンズとスタンフォード大学の V・ペトロシアンが、ヘラクレス座にある Abell370 とみず

がめ座の Cl2244-02 という二つの銀河団中で、円周の一部を切り取ってきたような巨大なアーチ構造を報告した (図 42)。銀河団 Abell370 のアーチは、仮想的な円の半径が 15 秒角くらい、円弧の開き具合が 80 度くらいで、一方、銀河団 Cl2244-02 のアーチは、半径 10 秒角ほどの円周を 110 度分くらい切り取った円弧になっている。それぞれ長さが見かけ上 30 万光年ぐらゐもあり、普通の銀河の直径が 10 万光年ほどだということを考えると、きわめて巨大なものであることがわかる。しかもこれらのアーチ構造は、巨大楕円銀河と同じくらい明るく、そのくせ楕円銀河よりはるかに青いものだった。

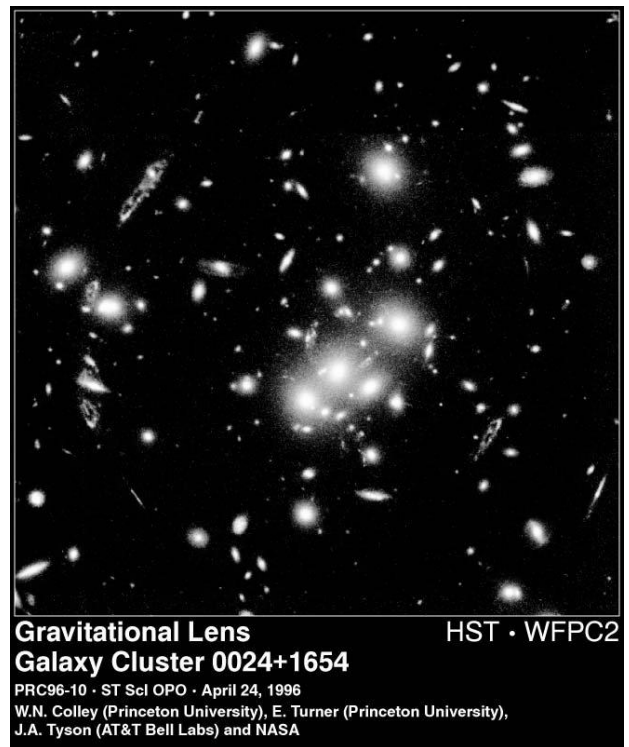


図 42 銀河団 0024+1654 (画像: STScI/NASA)

その後、1988 年になって、ヨーロッパ南天天文台の 3.6m 望遠鏡を用い、同天文台の B・フォートたちが、Abell370 の詳しい分光解析を行った。その結果、アーチ構造の部分の赤方偏移が 0.724 であることがわかった。それに対して、アーチの見かけ上の中心にある銀河団中の銀河の赤方偏移は 0.374 なので、

Abell370 という銀河団とアーチ構造の実体は、まるっきり違う距離にある天体であることがわかった。それもアーチの方が銀河団よりはるか彼方にあるのである。アーチは重力レンズ像だったのである。他のスペクトル解析からも、アーチの実体は遠くの銀河であり、それが手前の銀河団の重力場によってレンズ像として見えているということが確認された。

銀河団 Abell370 の巨大なアーチは、18 億光年の距離にある銀河団中の銀河重力場によってできた、31 億光年彼方の銀河の幻だったのである。

さて、重力レンズの法則は比較的よくわかっているので、レンズ像の大きさや広がりや形状などの情報を使って、重力レンズになっている天体——いまの場合は銀河団——の質量を見積もることができる。そして実際に見積もられたのだが、それによるとアーチ状のレンズ像を作っている銀河団の質量が、やはり明るさから推定される“光学的質量”よりも大きいのだ。これもまた、銀河団中のダークマターに関する新たな証拠だった。

余談だが、すでに 1937 年という早い時期にツヴィッキーは、重力レンズ効果を受けた銀河を観測すればダークマターを調べることができるだろう、と予言している。観測が予言に追いつくまでに半世紀かかったのである。

6.1.5 銀河団に束縛された高温ガス

銀河の集団である銀河団は、可視光の写真（たとえば図 42）では個々の銀河がまばらに集まっているように見えるが、銀河間の空間に何もないわけではない。以下で述べるように、銀河間の空間にも高温で希薄なガスが存在することがわかっている。高温のガスはそのガスの圧力で拡がろうとするので、高温ガスを銀河団の内部に閉じ込めるためには、それなりの重力が必要になる。そして、銀河団の銀河が飛び去らないようにするのと同様、

高温ガスが飛び散らないようにするためには、銀河団に含まれる銀河の総質量だけでは到底足りないのである。これもダークマターの存在を必要とする強い証拠だ。

高温ガスは X 線を放射するので、X 線で銀河団全体を観測すれば、その存在や分布は一目瞭然となる。たとえば、図 43 は日本の X 線衛星「あすか」が撮像した「かみのけ座銀河団（Coma cluster of galaxies）」（距離 2.9 億光年、銀河数約 100）の X 線画像である。個々の銀河に付随した高温ガスも写っているが、高温ガスの大部分は銀河団全体を取り巻くように広い範囲に分布していることがよくわかる。また X 線の強度の違いから、中心ほど高い密度になっていることもわかる。

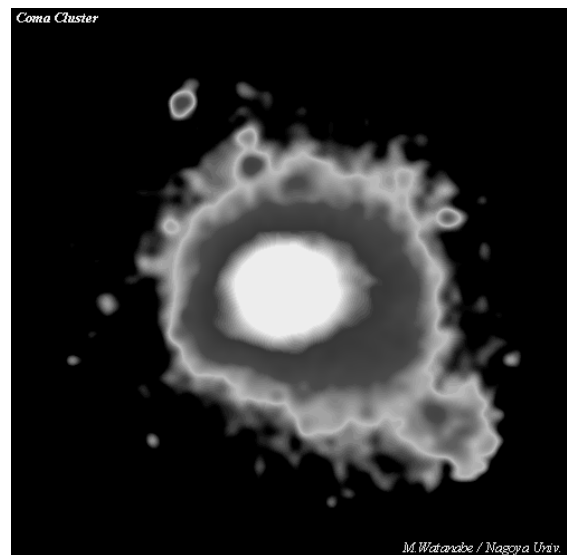


図 43 あすか X 線衛星が撮像したかみのけ座銀河団の X 線画像（栗野諭美ほか『宇宙スペクトル博物館<X 線編>』より）

このような高温ガスを閉じ込めるためには、上で述べたように、ダークマターの存在を仮定せざるを得ないのである。そして、

- ・銀河団の通常物質と暗黒物質の総量を M
- ・それらが球状に分布している
- ・その重力井戸内でガスが溜まっている（専門的には静水圧平衡になっている）
- ・高温ガスは理想気体である

・高温ガスは熱放射をしている
 (光学的に薄いので熱制動放射)
 などを仮定すると、X線観測から、銀河団中の質量分布(主としてダークマター)を求めることができる。

その結果、多くの銀河団では、ダークマターの分布は、おおむね、銀河の分布に似たような分布をしていることがわかっている。ただし、冒頭で紹介した弾丸銀河団のような例もあるが。

高温ガスの存在はX線を使えば直接に観測できるが、意外なことに電波を使って間接的に調べることも可能なのだ。使う電波は、宇宙全体に遍く満ちている3K宇宙背景放射である。まず図44をみてもらいたい。

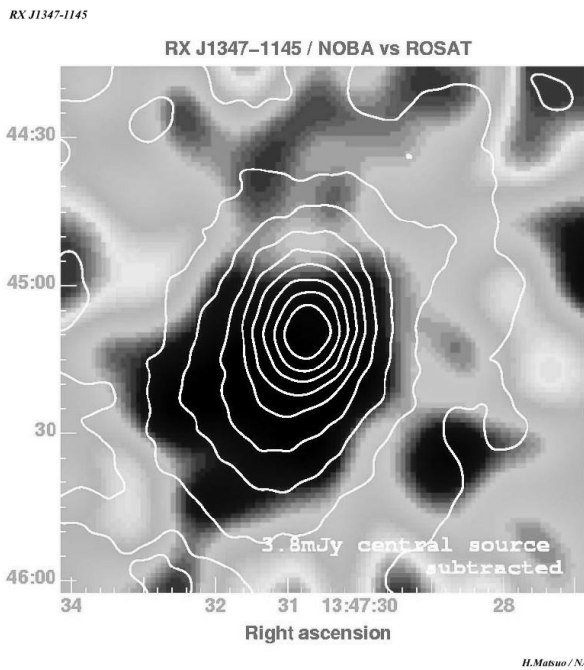


図 44 国立天文台野辺山ボロメータアレイで得られた、銀河団RX~J1347-1145周辺の3K宇宙背景放射の電波強度分布(栗野諭美ほか『宇宙スペクトル博物館<電波編>』より)

図 44 は、国立天文台野辺山観測所にある野辺山ボロメータアレイと呼ばれる電波望遠鏡で得られた、おとめ座方向にある銀河団

RX~J1347-1145周辺の3K宇宙背景放射の電波強度分布を表したものである。元の図は電波強度の強さがカラーで色分けしてあり、青から赤になるにしたがい波長2mmでの電波強度が強いことを示しているが、黒い部分は電波が非常に弱いことを表している。そして図44にあるように、3K宇宙背景放射が弱い領域がポツカリと穴を空けているのがわかるだろう。また白い等高線は、ローサットX線衛星で得られたX線の強度分布で、先に述べたように、高温ガスの分布を示している。比較したらわかるように、高温ガスのある領域で、3K宇宙背景放射の電波が非常に弱くなっているのだ。

すでに述べたように、3K宇宙背景放射は、ビッグバン火の玉宇宙の残照であり、宇宙全体に遍く満ちている絶対温度が約3Kの黒体放射だ。自然界に存在する電磁放射としては、もっとも黒体放射に近いスペクトルをしているものである。その3K宇宙背景放射は、高温ガスを閉じ込めた銀河団の向こう側からも到来する。そして3K宇宙背景放射の光子の一部は、銀河団中の高温ガスに含まれる電子と衝突するが、高温ガスの電子の方が3K宇宙背景放射の光子よりもエネルギーがはるかに高いので、いわゆる逆コンプトン散乱を起こすことになる。すなわち、3K宇宙背景放射の光子の一部は高温ガスの電子からエネルギーをもらい、その結果、銀河団を通り抜けてきた3K宇宙背景放射のスペクトルが全体として少し歪むことになる。具体的には、全体として、やや高エネルギー側にずれ、その結果、長波長のレイリー-ジーンズ領域の強度が減少することになる(図45)。したがって、図44のようにミリ波など長波長で銀河団を観測すると、周辺に比べて、銀河団の部分で電波が“暗く”なるのである。

このことは、すでに1970年、当時はまだソビエト連邦だった時代、ラシッド・A・ス

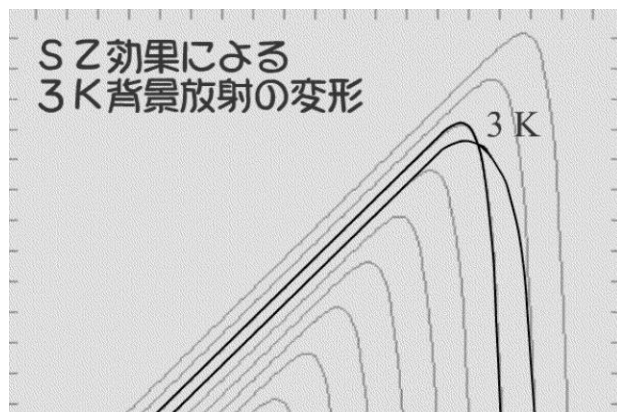


図 45 スニアエフーゼルドヴィッチ効果による 3K 宇宙背景放射スペクトルの変形

ニアエフ（Rashid Alievich Sunyaev；1943～、図 46）とゼルドヴィッチが指摘していたので、「スニアエフーゼルドヴィッチ効果（Sunyaev-Zel'dovich effect；SZ 効果）と呼ばれている。図 44 の銀河団 RX J1347-1145 は、SZ 効果により銀河団の構造が観測されたはじめての例なのだ。

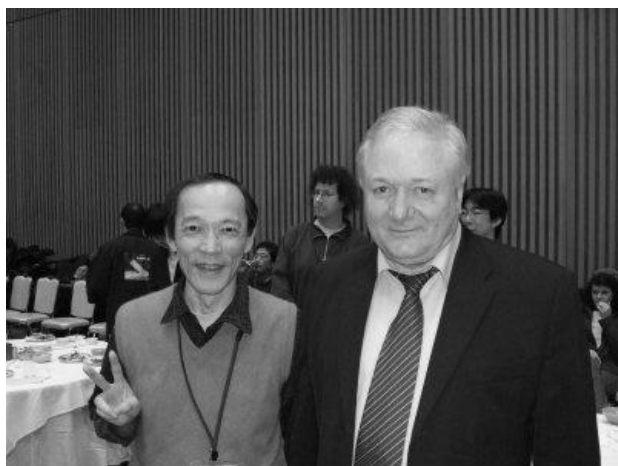


図 46 スニアエフ
京都で開催されたすざく国際会議の晩餐会で
(2006 年 12 月)。

ちなみに、スニアエフは、SZ 効果という名前が付いているぐらいだから、天文業界全体としてはおそらく SZ 効果の提唱者として有名だろう。しかし、ブラックホール降着屋にとっては、1973 年にシャクラとスニアエフが構築した標準降着円盤モデル(SS 論文)の提

唱者の一人として、伝説的な人物である。

以上のような、非常に多くの観測的実証のもとで、銀河団中には、通常物質の 10 倍ものダークマターが存在すると考えられるようになったのである。そしてそのもっとも最近の衝撃的な観測例が、冒頭に述べた弾丸銀河団であった。

6.2 ダークマターと CDM

ニュートンとアインシュタインを信奉する限り、観測的には、ダークマターと呼ばれるなにがしかの物質が必要であることはわかっただろう。ではつぎに、そのダークマターの候補をまとめておこう。ダークマターは目に見えないだけに、具体的な正体を突き止めるのは非常に難しく、どうしても理論的な考察が中心となる。そして、孤立したブラックホールとか、褐色矮星や白色矮星、原始ブラックホール、そしてニュートリノやアクシオンなどの不可思議な素粒子まで考えられた。以下、それらを二つに大別して紹介しよう。

6.2.1 候補その 1 筋肉男 MACHO

まずダークマターの候補として一つのタイプは、たとえば、ブラックホールとか、質量が小さすぎて星として光れなかった褐色矮星とか、木星のような惑星とか、塵とか、そんなのが考えられる。とにかく、光ってはいないけど質量はもっている普通の物質だ(表 1)。より正確に言えば、パソコンや家など身の回りの物体を形成しているバリオン物質だ。このような普通の物質からなる(かもしれない)ダークマターに対して、総称として MACHO (筋肉男) というニックネームが与えられている。MACHO (=MAssive Compact Halo Objects) は、重たくて (MAssive) コンパクトな (Compact) ハロ (Halo) 領域にある天体 (Objects) の頭文字をつなげたものだ。

表1 暗黒物質の候補1

| MACHO | 質量 | |
|---------|----------------------------------|---|
| 褐色矮星 | $< 0.08M_{\odot}$ | △ |
| M型矮星 | $0.1M_{\odot}$ | △ |
| 白色矮星 | $1M_{\odot}$ | ○ |
| 中性子星 | $2M_{\odot}$ | ○ |
| ブラックホール | $\sim 10M_{\odot}$ | △ |
| 大質量 BH | $100 \sim 10 \text{ 万}M_{\odot}$ | △ |
| 超大質量 BH | $> 10 \text{ 万}M_{\odot}$ | × |

$M_{\odot} = 1$ 太陽質量

表の天体について、少しだけ説明しておこう。まず「褐色矮星 (brown dwarf)」は、最近では比較的知られていると思うが、質量が太陽の 8% よりも小さな主系列星になれない星である。すなわち、質量が小さいために中心温度が十分に上昇せず、中心で太陽のような核融合反応を起こすまでには至らない星で、原始星として誕生したときに短時間だけ重力エネルギーで輝いた後は、ただただ暗くなっていく星である。非常に数は多いと想像されていて、実際、最近の高精度赤外線観測によって、褐色矮星は通常の恒星の 2 倍くらいはあることがわかってきた。しかし、数が何倍かあっても質量が小さいために、褐色矮星全体の総質量は、通常の星の総質量の 10% 程度にしかならず、ダークマターの候補としてはほぼ脱落するだろう。

なお、水素 (陽子 1 個) 同士が核融合する条件 (温度と密度) に比べると、水素と重水素 (陽子 1 個 + 中性子 1 個) が核融合する条件の方が緩いため (余分な中性子の分だけ核力が強い)、褐色矮星でも“重水素”の核融合は可能である。ただし、水素に比べて重水素の量はそもそも少ないので、重水素の核融合によるエネルギー発生は高がしれていると思

う (核融合は鬼門で、あまりちゃんと知らない)。

白色矮星や中性子星やブラックホールは、通常の恒星が終末を迎えたときに形成されるので、星の進化論などから、それらの総量がどれくらいになるか、ある程度の見積もりはできる。というより、恒星進化論まで持ち出さなくても、白色矮星を残すような太陽程度の恒星の寿命がだいたい 100 億年であることから考えると、白色矮星が星の何十倍も生まれていることはありえないだろう。中性子星やブラックホールを残す大質量星の寿命は短い、大質量星の数は少ないので、結果、中性子星やブラックホールも通常の星の数ほどはないだろう。という、ごく単純な見積もりだけでも、これらの天体もやはり、ダークマターの候補としては、その質量の一部を説明できる程度だと思われる。

褐色矮星にせよブラックホールにせよ、暗くても質量をもった天体—MACHO ならば、背景の星々に対して重力レンズ効果を及ぼす。もちろん、MACHO がどこにあるかはわからないのでどこを見たらいいかもわからないのだが、銀河系の中心方向やマゼラン銀河の方向などたくさんの星々を観測していれば、そのうちのいくつかは手前の“見えない”MACHO による重力レンズ効果を受けて瞬くだろうと見積もられた。このような戦略のもとで 1990 年代に精力的に MACHO 探しが行われ、実際に 1993 年 9 月、三つのグループがほぼ同時に発見したのである (図 47)。

その後は MACHO も“見える”ようになり、その総量などもだんだんわかってきた。それによると、銀河系のハロなどで重力レンズ効果を引き起こして発見された MACHO の質量は、典型的には 0.15 太陽質量から 0.9 太陽質量程度 (おそらく白色矮星あたりだろう) で、銀河系と取り巻くダークマターハロの総質量の 20% くらいにはなりそうだ。しかし、

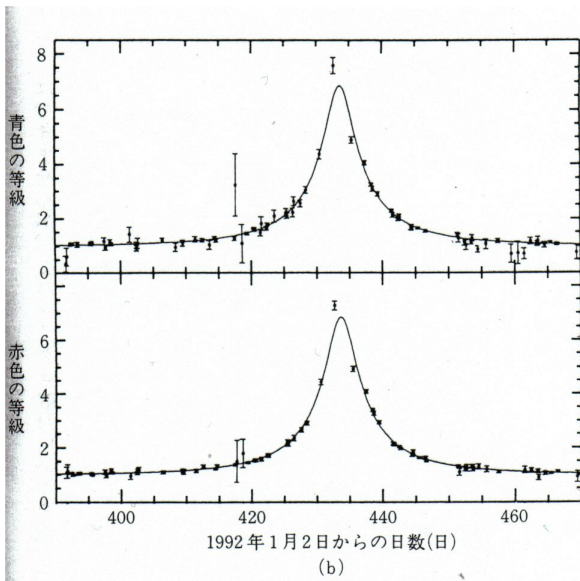


図 47 MACHO の発見 (Alcock et al.)
MACHO の重力レンズ効果によって、遠方の星の光が増光したときの光度曲線。重力レンズ効果による増光は、増光と減光が対称であること、光度曲線が波長によらないこと、などから、変光星などの光度曲線とは容易に区別できる。

これではダークマター全体を説明するには、まだまだ足りないようである。

6.2.2 候補その2 弱虫野郎 WIMP

もう一つのタイプの候補としては、たとえば、ニュートリノとか、アクシオンとか、ある種の素粒子が考えられる(表2)。ニュートリノは実際に発見されているが、アクシオンは理論上の存在である。こちらの方は、WIMP (弱虫野郎) というニックネームが付いている。WIMP (=Weakly Interacting Massive Particles) は、他の物質とほんのわずかしこ (Weakly) 影響し合わない (Interacting) 質量をもった (Massive) 素粒子 (Particles) を意味する英語の頭文字をつなげたものだ。弱い相互作用しかしないという点で、なかなか意味が通っている。歴史的には、WIMP というニックネームができてから MACHO が造語された。

表 2 暗黒物質の候補 2

| WIMP | 質量 |
|--------|-----------------------------------|
| アクシオン | $10^{-2} \sim 10^{-5} \text{ eV}$ |
| ニュートリノ | $1 \sim 10 \text{ eV}$ |
| フォティーノ | $\sim 1 \text{ GeV}$ |
| ジーノ | |

$1 \text{ eV} = 1.78 \times 10^{-33} \text{ g}$

$1 \text{ GeV} = 10 \text{ 億 eV}$

ダークマターを説明するには、MACHO では“力”不足らしい。では、幽霊粒子ニュートリノなどの WIMP なのだろうか？

ニュートリノは非常に大量に存在するので、質量がある程度大きければダークマターを説明するのに足りると思われていた。しかしまのところ、実験的には、ニュートリノの質量は電子の 10 万分の 1 程度、 $0.1 \sim 1 \text{ eV}$ ぐらいと見積もられている。ダークマターの総量を説明するには 10 eV から 20 eV は必要なので、ニュートリノではやはり足りないようだ。

現在、ダークマター候補の WIMP としては、素粒子の統一理論である超対称性理論から予想される「フォティーノ (photino; 光子の超対称性パートナーであるフェルミ粒子)」や「ジーノ (zino; Z ボソンの超対称性パートナーであるフェルミ粒子)」「グラビティーノ (gravitino; 重力子の超対称性パートナーであるフェルミ粒子)」などのいわゆる“ニュートラリーノ (neutralino)”と総称される素粒子と、クォーク間の強い力に関連して予想されている「アクシオン (axion)」が考えられている(図 48)。

前者のニュートラリーノの質量は陽子の 100 倍くらいと予想されるので、もしニュートラリーノがダークマターならばコップ 1 杯の 1 個ぐらいのニュートラリーノがある勘定

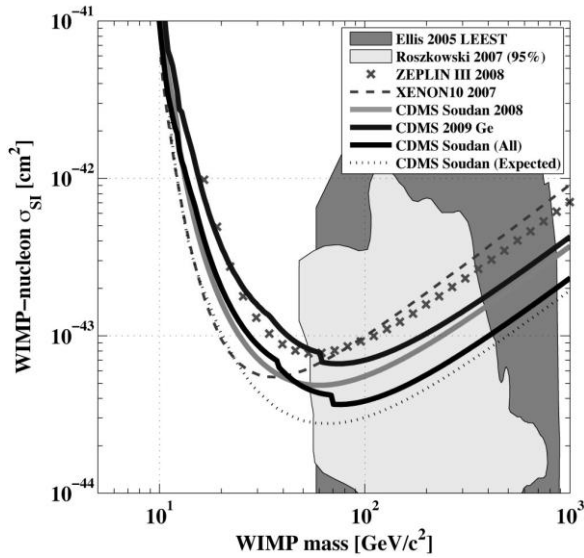


図 48 WIMP の質量と相互作用の断面積
 いろいろな曲線はいくつかの実験で測定された断面積の上限を表している。塗りつぶされた領域（原図では灰色と薄緑）は超対称性理論で予想される WIMP の範囲を示している。

（出典：<http://www.symmetrymagazine.org/breaking/2009/12/17/dark-matter-experiment-results-announced/>）

になる。一方、後者のアクシオンの質量は電子の 1 兆分の 1 ($10^{-2} \sim 10^{-5}$ eV) ぐらいと予想されるので、もしアクシオンがダークマターならば角砂糖 1 個の中にもアクシオンが 1 兆個ある勘定になる。

なお、アクシオンやニュートリノの質量は小さいので (massive でない)、最近では、フォティーノやジーノなど massive な素粒子のみを WIMP と呼ぶこともあるようだ。

候補のまとめを図 49 に示しておく。

6.2.3 ホット (HDM) とコールド (CDM)

さて、ダークマターの正体が、通常のバリオン物質とはほとんど相互作用しないある種の素粒子だとした場合、いくつかのタイプの素粒子が考えられているわけだが、それらは素粒子の運動状態によって、大きく、「熱いダークマター (HDM; hot dark matter)」と「冷

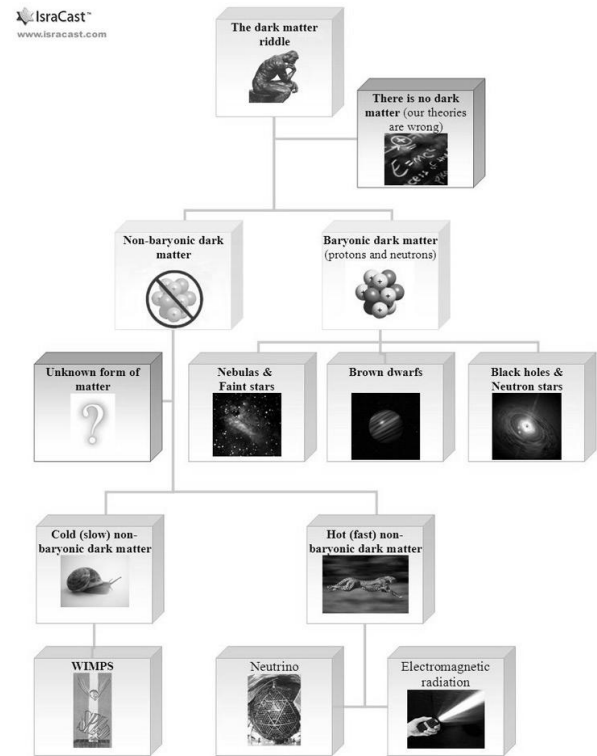


図 49 ダークマターの候補

（出典：<http://www.physorg.com/news7058.html>）

たいダークマター (CDM ; cold dark matter)」とに大別される…ようやく CDM が出てきた。

ここでホットとかコールドというのは、必ずしもダークマターの温度を表しているわけではない。もしダークマター素粒子が熱平衡になっていれば、その温度というものに意味があるが、ほとんど相互作用しない素粒子なので、そもそも熱平衡になっているかどうか不明で (おそらく熱平衡にはなっていない)、熱平衡でなければダークマターの温度は定義できない。

慣用的にホットやコールドと言い習わしているが、ここでホットというのは素粒子の運動速度が光速に近く相対論的であるという意味で、コールドというのは非相対論的な速度で運動しているという意味である。

具体的には、たとえば、ニュートリノは、

膨張宇宙において1秒ぐらいの時点でバリオン物質と分離した（バリオン物質とほとんど相互作用しなくなった）。このころの宇宙の温度（これは意味のある温度）は1000億Kとか100億Kという高温であり、分離時点でのニュートリノの温度は非常に高温で、光速に近い速度で熱運動していた。宇宙が膨張するに従い運動速度は下がってはいくものの、現在でもニュートリノはかなり高速で飛び回っている。したがって、ニュートリノはHDMに類別される。

一方、フォティーノなどのニュートラリーノは、ニュートリノよりももっと早い時期、おそらく 10^{-14} 秒ぐらいの宇宙ごく初期に、バリオン物質などと分離し、その後はほとんど相互作用しなくなったと考えられている。この時期の宇宙も非常に高温ではあるが、ニュートラリーノなどの質量が非常に大きい（と予想されている）ため、分離した時期にはすでに相対論的速度で飛び回る粒子ではなかった（非相対論的粒子になっていた）だろう。そして、宇宙膨張とともに単純に冷えていって、いわゆるCDMになったのだ。

宇宙の構造形成において、HDMとCDMの重要な差異は、その正体というよりも、重力的に束縛しやすいかどうかという点だろう。そもそもDMは重力以外の相互作用をほとんどしない素粒子（だと考えられている）なので、他の粒子との衝突によって減速することがあまりない。それでもCDMは運動速度が小さい非相対論的粒子なので、重力で集まりだしたら、全体として重力場に束縛されてしまう。むしろ重力収縮した結果、全体の重力場と釣り合う速度（ビリアル速度）で平衡する。

しかし、HDMはある集団になって全体の重力場を感じても、その重力場の脱出速度よりはるかに大きな速度で運動しているので、その重力集団を容易に抜け出すことができる。

結果としては、HDMは非常に重力収縮しにくい。

6.3 HDMシナリオとCDMシナリオ

先に述べたように、HDMは重力的に束縛されにくい。輻射優勢宇宙においてHDMの密度ゆらぎが生じてても、HDMの素粒子はほぼ光速でランダムな方向に運動しているので、そのようなゆらぎはかき消されてしまうのだ。このことを「自由流減衰（free streaming damping）」と呼んでいる。ダークマターの大部分がニュートリノのようなHDMだとすると、この自由流減衰によって、超銀河団（ $10^{16}M_{\odot}$ 程度）よりも小さな密度ゆらぎは消滅してしまうだろうと考えられる。言い換えれば、HDMの場合は、最初にできる構造は超銀河団のスケールで、それが分裂して銀河団や銀河のような構造が形成されていくことになる（古典的シナリオのパンケーキ説に似ている）。これが現在の「HDMシナリオ」の粗筋である。

一方、CDMは自由流減衰がないので、ダークマターの大部分がCDMだとすると、いろいろなサイズの密度ゆらぎが成長できる。そのようなときには、小さい密度ゆらぎの方ができやすく成長しやすい（図50）。したがって、CDMの場合は、最初に銀河ができ、つづいて銀河団、そして超銀河団と構造が形成されていくことになる（古典的シナリオのクラスタリング説に似ている）。これが現在の「CDMシナリオ」の粗筋である。これらのHDMシナリオやCDMシナリオは、それぞれ、古典的シナリオのパンケーキ説やクラスタリング説に似ているが、古典的モデルではバリオン物質だけで考えていたのに対し、現代のモデルはダークマター（や時空構造その他のあらゆるもの）のゆらぎを考えている点が根本的に異なる（図51）。

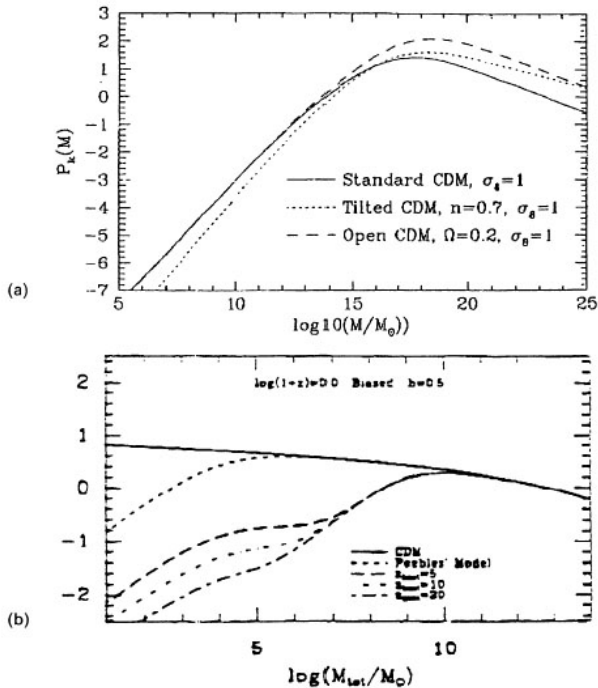


図 50 CDM の密度ゆらぎの質量（横軸）の関数として表したパワースペクトラム（上）と密度ゆらぎの大きさ（下）

とりえず、上の図は気にせずに、下の図を見てもらえばいい。下の図の実線が標準的な CDM モデルの場合で、小さい質量（図の左方）でも密度ゆらぎが成長することを示している。下の図の他のグラフは、いろいろな効果を入れたもので、たとえば、CDM が再加熱したりすると、 $10^9 M_\odot$ より小さいスケールの密度ゆらぎが抑えられて、 $10^9 M_\odot$ ぐらいの密度ゆらぎが成長しやすくなることを意味している。（出典：<http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/Sep01/Ostriker/Figures/figure1.jpg>）

6.4 Λ CDM モデル

銀河や銀河団の観測、そして 3K 背景放射の観測などと照らし合わせると、(古典的シナリオではクラスタリング説の方が有力だったのと似て)、いろいろな構造形成をうまく説明するためには、HDM シナリオよりも CDM シナリオの方が優れているようにみえる。

さらに現在は、宇宙の時空構造に「ダークエネルギー (dark energy)」というものが存

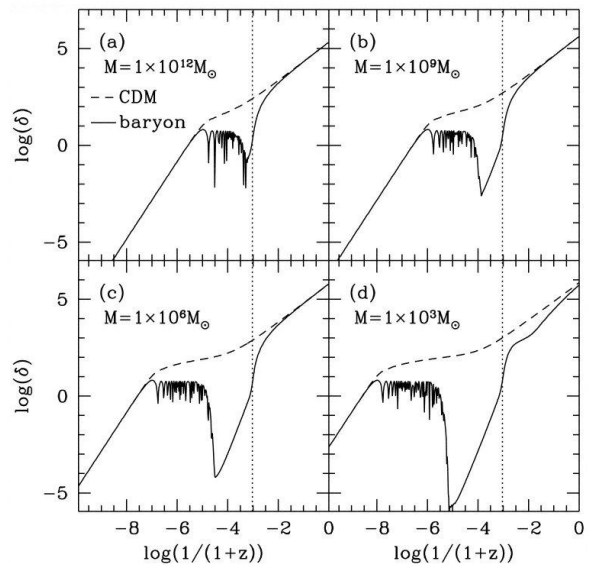


図 51 ダークマターとバリオン物質の密度ゆらぎの成長の計算例

横軸が赤方偏移のある関数（左が過去、右が現在）で、縦軸が CDM の密度ゆらぎの成長（破線）とバリオン物質の密度ゆらぎの成長（実線）。パネル (a) から (d) はバリオン物質の質量の違い（各パネルの左隅）。これは Λ 項のない単純な CDM モデル ($\Omega_M=1, \Omega_B=0.1$) での計算例である。（Yamamoto *et al.* 1998 より）

在すると考えられている。

アインシュタインが自分の作り上げた一般相対論を用いて宇宙全体を表す方程式、「アインシュタイン方程式」(次頁参照) を導いたとき、その方程式は、時間や空間の曲がりなど時空の計量構造を表す左辺と、その時空における物質とエネルギーの分布を表す右辺からなっていた。この方程式は、時空構造と物質という異質なモノ同士を結びつけたもので、物質は時空の曲がりに沿って運動し、また時空の曲がり方は物質の分布によって決まってしまうことを意味している。

このアインシュタイン方程式を宇宙全体に対して適用すると、もし宇宙全体の物質分布（右辺）を与えることができれば、アインシュタイン方程式から、宇宙の時空構造（左辺）

ポワソン方程式

$$\Delta\Phi = 4\pi G\rho \quad (1)$$

Δ : 空間偏微分演算子

Φ : 重力ポテンシャル

ρ : 密度分布

アインシュタイン方程式

$$R_{ik} - \frac{1}{2}Rg_{ik} + \Lambda g_{ik} = -\frac{8\pi G}{c^4}T_{ik} \quad (2)$$

g_{ik} : 時空の計量テンソル

R_{ik} : リッチテンソル

R : スカラー曲率

Λ : 宇宙定数 (宇宙項)

エネルギー運動量テンソル

$$T_{ik} = (\varepsilon + p)u_i u_k - pg_{ik} \quad (3)$$

u_i : 4元速度

ε : 物質のエネルギー密度

p : 物質の圧力

を決めることができる。あるいは、逆にみれば、もし宇宙の時空構造（左辺）を決めたとすると、アインシュタイン方程式から、その構造に合うための物質の分布（右辺）が指定されるのである。

そして、アインシュタインが宇宙の構造モデルを作ろうとしたときに、物質自身の重力によって宇宙が潰れてしまうのを防ぐために、当初の方程式の左辺に、引力に抗して宇宙を広げようとする力「宇宙斥力」の項を付け加えた。今日では「宇宙項／宇宙定数」、あるいはその変数の文字から「 Λ 項（ラムダ項）」と呼ばれる。アインシュタイン方程式の左辺は、曲がった時空の構造を表しているのだから、左辺に Λ 項を入れたということは、 Λ 項に対して時空構造に内在する反発力（反重力）の場という意味をもたせたことになる。

一方、アインシュタイン方程式は等号で結びつけられた式なので、 Λ 項を右辺に移動しても等式は成り立つ。数学的にはただの移項にすぎないが、物理的には新しい意味合いが生じ、最初の解釈とは異なる再解釈となる。

すなわち、アインシュタイン方程式の右辺

は宇宙に存在する物質・エネルギーの分布を表しているのだから、右辺に移項した Λ 項に対しては宇宙に存在するある種のエネルギー場という意味をもたせたことになるのだ。そのエネルギー場に対して、現在「ダークエネルギー」という名称が付与されているのである。

ただし、すでに述べたように（エポック1）、ダークエネルギーは常識とは非常にかけ離れた性質を有している。すなわち、まず正のエネルギー密度をもつ一方で“負”の圧力をもっている。そういう存在物は身近なものにはまったくない。さらに、その正のエネルギー密度は空間の体積に比例している。だから、宇宙が膨張して体積が増えるほどダークエネルギーも増えることになる。これは Λ 項の解釈のもとでは、反発力の場としての Λ 項が宇宙を膨張させる原動力という解釈になる。

いずれにせよ、 Λ 項／ダークエネルギーは理解に苦しむ代物だが、遠方宇宙の精密な観測からは、 Λ 項／ダークエネルギーが存在しないと「宇宙の加速膨張」を説明できない。すなわち、アインシュタインの一般相対論の枠組みの中では、観測的に実証された存在なのである。

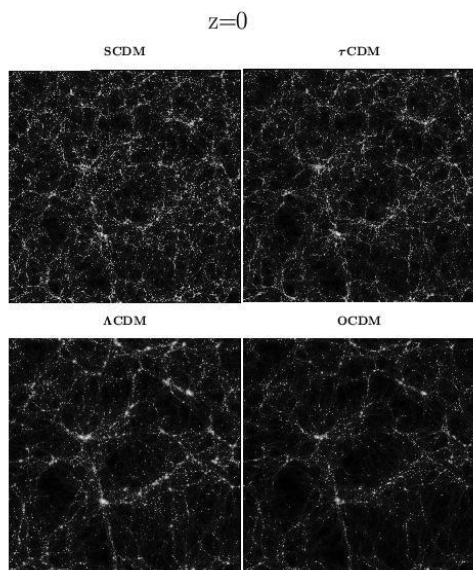
以上のことから、現在の膨張宇宙モデルでは、宇宙全体の時空構造ではこのダークエネルギーを考慮しないといけない。そのようなダークエネルギーを考慮した膨張宇宙におけるCDMのゆらぎから構造形成を考えるモデルが、「 Λ CDMモデル」である（内容的・意味的には“ダークエネルギー宇宙コールドダークマターモデル”と言ったところだろうが、DECDMよりは Λ CDMの方が格好はいい）。それに対して、ダークエネルギーを考えない単純なCDMモデルは、標準CDM（SCDM）モデルと呼ばれる。数値的には、

標準CDM（SCDM）モデル： $\Omega_M=1$

Λ CDMモデル： $\Omega_M=0.3$ 、 $\Omega_\Lambda=0.7$

という値になる。他にも τ CDMモデルとか

OCDM (Open CDM) モデルなどいくつかのバリエーションがある (図 52)。



The VIRGO Collaboration 1996

図 52 いろいろな CDM モデルに基づいてシミュレーションした、現在 ($z=0$) におけるおとめ座銀河団のモデル計算例

左上から、標準 CDM (SCDM) モデル、 τ CDM モデル、 Λ CDM モデル、OCDM モデル。(出典：http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/int_sims/index.shtml)

図 52 は、いろいろなタイプの CDM モデルにもとづいてシミュレーションした、おとめ座銀河団のモデル計算例である。似たような計算は数多く行われている。どういふことをするかと言うと、おおざっぱには、バックグラウンドとなる膨張宇宙のモデルを与え (たとえば、 Λ 項のある膨張宇宙モデル)、そこに CDM を表す粒子をばらまいて、ランダムなゆらぎ (あるいはランダムでないゆらぎ) を加え、後は、宇宙の膨張とともに CDM が重力作用によってどのように構造を形成していくかをシミュレーションするのである。放射やニュートリノなど他の要素を入れ込むこともある。

シミュレーションの結果、途中経過、ある

いは最終的にできた構造が、現在の宇宙の大規模構造と合致しているかどうかを比較して、似ていれば OK、似ていなければ×の判定を下すのだ。大規模構造というパターンの判定なので、難しそうな感じもするが、「2点相関関数」と呼ばれる方法も含め、いろいろな定量的方法が知られている。

そして、いまのところは、 Λ CDM モデルが、現在の大規模構造を形成するには、もっともらしいモデルとされているのだ。

……つづく……

参考文献

- [1] バーバラ・ライデン (2003) 『宇宙論入門』 (牧野伸義 訳), ピアソン・エデュケーション.
- [2] Davis, M., Peebles, P. J. E. (1977) *ApJS*, **34**, 425.
- [3] Silk, J. (1968) *ApJ*, **151**, 459.
- [4] Silk, J. (1982) in *Astrophysical Cosmology*, H. A. Bruck *et al.* (eds), Pontificia Academia Scientiarum, p.427.
- [5] Jeans, J. (1902) *Phil. Trans. Roy. Astron. Soc.*, **199**, 1.
- [6] Lifshitz, E. (1946) *Jl. Phys. Acade. Sci. USSR*, **10**, 116.
- [7] Zeldovich, Ya. B. (1970) *A&A*, **5**, 84.
- [8] Doroshkevich, A., Sunyaev, R., Zeldovich, Y. (1974) *IAU Symp No 63*, 213.
- [7] Longair, M. S. (2008) “Galaxy Formation”, Springer, New York.
- [8] Yamamoto, K., Sugiyama, N., Sato, H. (1998) *ApJ*, **501**, 442.

福江 純 (大阪教育大学)